

秸秆还田与氮肥配施对中南地区稻田土壤固碳和温室气体排放的影响

冯晓赞^{1,2}, 万鹏¹, 李洁¹, 赖欣¹, 张贵龙^{1*}, 常泓^{2*}

(1.农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2.山西农业大学生命科学院, 山西 太谷 030800)

摘要: 秸秆还田和氮肥施用是影响稻田土壤固碳潜力和温室气体排放的重要农作措施。通过研究油菜秸秆全量还田并配合施入不同量氮肥(150、225、300 kg·hm⁻²和375 kg·hm⁻²)对稻田土壤固碳量和温室气体排放的影响, 评估综合增温潜势, 对分析秸秆还田配施氮肥对稻田固碳效果有重要作用。结果表明, 与单施氮肥和单施秸秆处理相比, 秸秆还田配施氮肥显著增加土壤固碳量, 秸秆配施氮肥处理固碳量最高值为147.74 kg·hm⁻², 比单施氮肥处理平均高出38%。在降低温室效应方面, 与单施氮肥相比, 秸秆配施氮肥处理显著降低N₂O的累积排放量; 与单一秸秆还田处理相比, 秸秆配施氮肥处理显著提高水稻产量, 降低CO₂的累积排放量, 但在一定程度上增加了CH₄的排放。秸秆配施氮肥处理的温室气体强度和综合温室效应分别为0.372、5 394.22 kg CO₂-eq·hm⁻², 显著低于单施氮肥处理的0.630、9 339.94 kg CO₂-eq·hm⁻², 以及单一秸秆还田处理的0.816、9 872.2 kg CO₂-eq·hm⁻², 因此, 秸秆还田配施氮肥是降低温室气体排放强度、减缓净温室效应的有效措施。

关键词: 秸秆还田; 土壤固碳量; 温室气体排放; 温室效应

中图分类号: S181

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2016)06-0508-10

doi: 10.13254/j.jare.2016.0119

引用格式:

冯晓赞, 万鹏, 李洁, 等. 秸秆还田与氮肥配施对中南地区稻田土壤固碳和温室气体排放的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(6): 508-517.

FENG Xiao-yun, WAN Peng, LI Jie, et al. Effects of Straw Returning Combined with Nitrogen Fertilizer on Paddy Soil Carbon Sequestration and Green-House-Gas Emission in Central South Region of China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2016, 33(6): 508-517.

Effects of Straw Returning Combined with Nitrogen Fertilizer on Paddy Soil Carbon Sequestration and Green-House-Gas Emission in Central South Region of China

FENG Xiao-yun^{1,2}, WAN Peng¹, LI Jie¹, LAI Xin¹, ZHANG Gui-long¹, CHANG Hong²

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 2. Academy of Life Sciences, Shanxi Agriculture University, Taigu 030800, China)

Abstract: Application of the straw and fertilizer can affect the potential of soil carbon sequestration and green-house-gas (GHG) emission in paddy field. This study returned straw of oilseed rape (*Brassica campestris* L.) with different quantity of nitrogen fertilizer (150, 225, 300 kg·hm⁻² and 375 kg·hm⁻²) to figure out the effect of straw returned accompanied with nitrogen fertilizer on soil carbon sequestration and GHG in paddy field and to assess the global warming potential (GWP). The results showed treatments of straw returning with nitrogen fertilizer significantly increased the soil carbon sequestration, with the highest value of 147.74 kg·hm⁻², 38% higher than only nitrogen fertilizer treatments on average. It suggested the straw-returning with nitrogen fertilizer could increase the soil carbon sequestration in contrast to the only nitrogen fertilizer treatments. Meanwhile, compared with the only nitrogen fertilizer treatment, straw returning with nitrogen fertilizer could increase rice yield, while reduce the CO₂ emission, however, it increased CH₄ emission slightly. The green-house-gas intensity (GHGI) and GWPs of straw returning with nitrogen fertilizer was 0.372, 5 394.22 kg CO₂-eq·hm⁻², which was significantly lower than the only nitrogen fertilizer of 0.630, 9 339.94 kg CO₂-eq·hm⁻² and straw returning treatment of 0.816, 9 872.2 kg CO₂-eq·hm⁻², respectively. It suggested the straw returning with nitrogen fertilizer could reduce GHGI emission and mitigate the global warming efficiently.

Keywords: straw returning; soil carbon sequestration; green-house-gas (GHG) emission; global warming

收稿日期: 2016-05-06

基金项目: 国家科技支撑计划“中南城郊环保型高效农业模式研究与示范”项目(2014BAD14B05); 农业部引进国际先进农业科学技术项目(2015-Z7-2016-X53); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2015-aepi-08)

作者简介: 冯晓赞(1988—), 男, 山西太原人, 硕士研究生, 主要研究方向为秸秆还田下土壤碳氮循环及其生态效应。E-mail: jeason2255@163.com

* 通信作者: 张贵龙 E-mail: zgl-2008@126.com 常泓 E-mail: 941004578@qq.com

秸秆还田在缓解焚烧所带来的巨大环境问题的同时,还能有效增加土壤有机质,具有可观的固碳潜力^[1],被普遍认为是一项有效的培肥地力措施^[2-3]。水稻-油菜生产系统是中南地区重要的水旱轮作模式之一,且我国油菜秸秆的年产量高达2 000万t^[4-6],寻求油菜秸秆的无害化处理途径成为各方广泛关注的议题,其中作物秸秆就地还田是重要的无害化处理方式。然而,传统的秸秆直接还田,存在还田秸秆难以分解的问题,以及在秸秆粉碎还田初期,土壤有效氮被微生物争夺固定而影响后茬作物生长的现象^[7]。近年来,大量试验都显示,与传统单一秸秆还田或单施化肥相比,秸秆还田结合氮肥施用能提高土壤养分供应能力^[8],提高作物产量^[9];还可以降低水稻增产对化肥的依赖,解决单施化肥带来的环境污染问题^[10]。但是秸秆还田配施氮肥对稻田生态系统服务功能方面的研究仍缺少报道。

农业温室气体减排是农业生态系统服务功能的重要评价指标。全球温室效应早已倍受关注,据联合国粮食及农业组织(FAO)的数据表明,全球种植业的温室气体排放占到全球人为温室气体排放的30%^[11]。而稻田是全球主要的农业种植体系,据估算我国稻田CH₄的排放可达9.67~12.66 Tg·a⁻¹,约占世界稻田CH₄的排放总量的1/4^[12]。单一秸秆还田和化学氮肥的不合理使用,都会引发我国稻田温室气体排放量的增加。逯非等^[13]发现由秸秆直接还田增排CH₄所导致的综合温室效应是土壤固碳减排潜势的2.158倍,这意味着秸秆还田所导致的CH₄增排会大幅抵消土壤有机质增加带来的固碳减排效益。也有研究显示,稻田施用氮肥会出现CH₄和N₂O的消长关系,过量氮肥施用亦会激发N₂O的排放^[14]。相对于单一秸秆还田和单施氮肥处理,有报道显示秸秆还田配施氮肥能有效地降低秸秆还田引发的稻田土壤CO₂和CH₄的增排效应^[15],但由于氮肥施入一般会引发N₂O排放量的增加,因此秸秆还田配施氮肥对稻田土壤固碳和温室气体增温潜势的综合影响仍有待进一步研究。本研究通过全量油菜秸秆还田配施不同量氮肥,观测水稻不同生育期土壤有机质的变化和CO₂、CH₄、N₂O 3种温

室气体的排放情况,探讨不同秸秆/氮肥施加比例对土壤固碳量的影响,分析秸秆配施氮肥对稻田温室气体排放综合效应的影响,旨在为农业稻田土壤培肥和温室气体减排提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验在湖北省武汉市东西湖区东山镇风正顺生态农业基地(30°44'N, 114°01'E)开展。该地区属亚热带季风性湿润气候区,年降雨量1 296 mm,年平均气温16.6℃,土壤类型为棕红壤土,长期种植模式为水稻-油菜轮作。试验采用随机区组设计,处理包括:对照(不施加氮肥和秸秆,CK)、全量秸秆还田(S)、单施氮肥处理(U)和全量秸秆配施氮肥处理(SU)。其中,全量秸秆还田小区,施加秸秆量为每小区16 kg,即8 000 kg·hm⁻²,秸秆施入后使用机耕船将秸秆与土壤混匀;单施氮肥处理设4个水平(U1~U4),施氮量依次为150、225、300、375 kg·hm⁻²;全量秸秆配施氮肥处理设4个水平(SU1~SU4),依次为全量秸秆+施氮150、225、300、375 kg·hm⁻²;每个处理3次重复。试验小区长10 m,宽2 m,面积20 m²,小区之间用塑料农膜相隔。所用氮肥品种为尿素(含N 46%),磷肥为过磷酸钙(含P₂O₅ 16%),钾肥为氯化钾(含K₂O 60%)。参照当地施肥习惯,氮肥按底肥60%、追肥40%的比例施用,追肥在秧苗移栽后40~50 d(拔节期)撒施。磷肥和钾肥全部作底肥,在插秧前一次性施入,磷(P₂O₅)施入量为90 kg·hm⁻²,钾(K₂O)为120 kg·hm⁻²。供试秸秆和土壤信息如表1所示。供试水稻品种为Y两优1928,由湖北省农业科学院提供。水稻于2015年6月上旬进行移栽,2015年10月上旬收获。田间管理依照当地常规种植水稻习惯,在苗期、分蘖期进行淹水,拔节抽穗期进行间歇式灌溉保持一定田间水位,成熟收获期进行落干等水管理。期间适时进行除草和病虫害防治,当年10月收获,每个小区单收单打分别计算收获水稻生物量和水稻籽粒产量。

1.2 样品采集

水稻土壤样品的采集分别在水稻的苗期、分蘖

表1 供试土壤及秸秆的基本性质

Table 1 Properties of the paddy soil and straw

材料 Material	有机碳 Organic C/g·kg ⁻¹	全氮 Total N/g·kg ⁻¹	碱解氮 Available N/mg·kg ⁻¹	速效磷 Available P/mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/mg·kg ⁻¹	pH值	碳氮比 C/N
棕红壤	21.95	1.39	144.60	6.37	38.46	6.94	15.79
秸秆	634.9	5.88	—	—	—	6.32	108

期、灌浆期、拔节期和成熟期进行。水稻于 2015 年 5 月 15 日开始育苗,2015 年 6 月 5 日进行插秧。土样的采集遵循“S”型多点法,用直径为 3 cm 土钻取 20 cm 深的土壤样品,将采集的土样混匀,风干,测定土壤有机质。

稻田温室气体集中在 CK、S、U3、SU3 处理进行采集,分别代表对照、单一秸秆还田、单施氮肥和秸秆还田配施化学氮肥处理。温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)的采集及测定利用静态箱-气相色谱法,在 3 个重复小区中布设 4 个静态箱。由于前期插秧等对土壤扰动较大,气体样品分别在水稻分蘖期、拔节期和收获期进行采集,生长旺盛期 7—8 月气体采集频率为每周 1 次,9 月份气体采集频率为两周 1 次,每次取样测定和记录气体采集箱内温度和 5、10 cm 土层温度。气体采集箱尺寸为 50 cm×50 cm×100 cm,箱体为不锈钢材质,外表面由挤塑板包裹,并用宽胶带固定。气体采集箱底座插入土中 20 cm,在收集气体前将底座凹槽加满水,用于阻断气箱内外气体交换。每次采样时间固定于上午 9:00—11:00 之间,分别在 0、10、20、30 min 用 100 mL 注射器多次抽取气体收集到铝箔气体采样袋(250 mL)内。利用气相色谱仪(Agilent 7890A)对 CO₂、CH₄、N₂O 含量进行检测,其中氢火焰离子化检测器(FID)测定 CO₂、CH₄ 含量,电子捕获检测器(ECD)测定 N₂O 含量。

1.3 分析及数据处理

1.3.1 温室气体排放通量和积累排放量

3 种温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)排放通量计算公式如下^[16]:

$$F = \frac{273}{273+t} \times \frac{dC}{dt} \times \frac{P}{P_0} \times \rho \times H \quad (1)$$

式中,F 为温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)排放通量(mg·m⁻²·h⁻¹);t 为气样采集过程中的平均温度(°C);dC/dt 为单位时间内气样采集过程中采样箱内气体的浓度变化梯度(mL·m⁻²·h⁻¹);P₀ 为标准大气压,P 为箱内气压,该试验地海拔为 21 m,气压影响可以忽略不计,此处≈1。ρ 为 3 种温室气体在标准状态下的密度(CO₂ 的密度为 1.816 kg·m⁻³、CH₄ 的密度为 0.714 kg·m⁻³、N₂O 的密度为 1.964 kg·m⁻³);H 为气体采集箱顶部与水面之间的高度(m);

3 种温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)的累积排量计算公式为^[16]:

$$F' = \sum_{i=1}^n F_i D_n \quad (2)$$

式中,F' 为温室气体累积排放量(单位为 kg CO₂-eq·hm⁻²),F_i 为各采样期内 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的平均排放通量,D_n 为采样期的天数(d)。

1.3.2 水稻季土壤固碳量

水稻季土壤固碳量为收获时与种植前土壤碳库之差,计算公式如下^[17]:

$$SOCP = (SOC_2 - SOC_1) \times BD \times H \quad (3)$$

式中,SOCP 表示试验在水稻整个生育期内(2015 年 6—10 月)有机碳的固定量,t·hm⁻²;SOC₁ 表示试验小区种植水稻前土壤有机碳含量,g·kg⁻¹;SOC₂ 表示水稻成熟期(收获后)土壤有机碳含量,g·kg⁻¹;BD 为水稻成熟期耕层(0~20 cm)土壤容重,g·cm⁻³;H 为耕层土壤厚度,取 20 cm。

为计算秸秆还田土壤固碳对增温潜势的影响,本研究通过公式(4)将稻田土壤固碳量折算为固持大气 CO₂ 的量(ATCS,单位为 kg CO₂-eq·hm⁻²)^[13]

$$ATCS = SOCP \times 44/12 \quad (4)$$

1.3.3 温室气体综合效应和排放强度

农田净温室效应目前用增温潜势来衡量,以 CO₂、CH₄、N₂O 3 种温室气体净交换量的 CO₂ 当量的代数和来计算。由于单位质量 CH₄ 和 N₂O 在百年时间尺度全球增温潜势分别是 CO₂ 的 25 倍和 298 倍,净温室效应可表示为^[13]:

$$GWP = CO_2 + CH_4 \times 25 + N_2O \times 298 - ATCS \quad (5)$$

式中,GWP 为 3 种温室气体引发的净增温潜势,单位为 kg CO₂-eq·hm⁻²;CO₂、CH₄、N₂O 为累积排放量,采用线性内插法计算。

$$GHGI = GWP/Y \quad (6)$$

式中,GHGI 为温室气体排放强度,其值的相对大小可以判断各处理的综合温室效应^[18],单位为 kg CO₂-eq·hm⁻²;Y 为水稻产量,kg·hm⁻²。

数据处理及相关统计分析利用 Excel 2007 和 SPSS 16.0 软件进行,数据图形的绘制利用 Origin 8.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田配施氮肥对稻田土壤理化性质的影响

如表 2 所示,秸秆还田配施氮肥对稻田土壤基本理化性质影响显著。与对照(CK)相比,秸秆还田显著提高了土壤有机质和 C/N。单一秸秆还田处理(S)有机质含量和 C/N 较对照分别提高了 19.3%和 21.9%。与 CK 和 S 处理相比,各处理稻田土壤全氮、碱解氮和有机质含量随施氮量的增加而增加。其中,U4 和

表2 收获期不同处理稻田土壤主要理化性质

Table 2 The main properties of the paddy soil in maturation phase under different treatments

处理	全氮/g·kg ⁻¹	有机质/g·kg ⁻¹	C/N	碱解氮/mg·kg ⁻¹	pH值	容重/g·cm ⁻³
S	1.59±0.03c	40.93±0.54e	14.93±0.20de	106.8±7.11bc	6.09±0.15bc	1.09±0.1e
SU1	1.63±0.01bc	45.98±1.47d	16.32±0.52cd	109.9±4.78bc	6.14±0.05bc	1.18±0.06d
SU2	1.67±0.02abc	51.55±0.78c	17.94±0.53bc	115.2±7.37bc	6.01±0.03c	1.28±0.02c
SU3	1.72±0.09ab	58.18±0.62b	19.70±0.56a	124.9±12.72ab	6.04±0.07bc	1.29±0.08bc
SU4	1.75±0.03a	62.59±1.35a	20.81±0.93a	141.3±7.70a	6.02±0.03bc	1.36±0.02a
CK	1.63±0.02bc	34.31±0.63f	12.25±0.36f	97.1±6.91c	6.25±0.08ab	1.10±0.06e
U1	1.64±0.01bc	39.61±0.60e	14.03±0.21e	101.7±7.13bc	6.45±0.08a	1.19±0.07d
U2	1.65±0.04abc	46.24±0.56d	16.25±0.49cd	118.3±7.70abc	6.16±0.02bc	1.30±0.13bc
U3	1.71±0.03ab	50.08±0.17c	17.01±0.37cd	120.1±8.25abc	6.16±0.04bc	1.35±0.04ab
U4	1.74±0.07a	57.30±0.70b	19.15±0.91ab	122.3±2.34abc	6.05±0.04bc	1.39±0.12a

注:同列不同字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: Different letters indicate significant difference among different treatments at 0.05 level. The same below.

SU4 处理碱解氮分别达 122.3 mg·kg⁻¹ 和 141.3 mg·kg⁻¹,显著高于低氮肥和无氮处理;SU3 和 SU4 处理土壤有机质分别达 58.18 g·kg⁻¹ 和 62.59 g·kg⁻¹,不仅显著高于对照和单一秸秆还田处理,也显著高于单施同等氮肥处理(U3、U4),增幅达 16.2%和 9.2%,说明秸秆配施氮肥有效提高了土壤碳氮养分含量。此外,秸秆和氮肥的添加显著增加了土壤容重;但在一定程度上降低了稻田土壤 pH 值,二者对土壤 pH 值的影响不显著。

2.2 稻田土壤固碳量

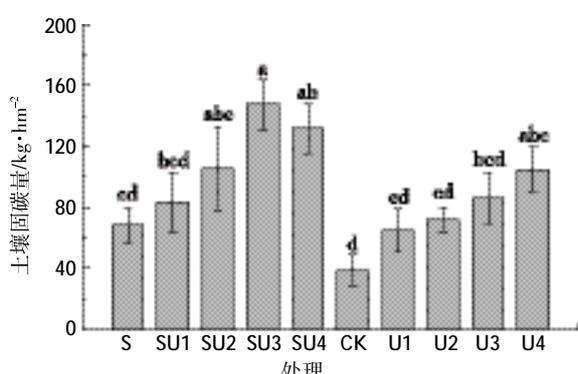
本研究中,施用秸秆和氮肥均可增加稻田土壤固碳量(图 1)。与单施氮肥和单一秸秆还田处理相比,秸秆还田配施氮肥对土壤有机碳固定量的影响较为明显,且均高于施加同氮量的单施氮肥处理,其中 SU3 处理与单施同等氮素的 U3 处理之间,差异达到

显著水平。此外随配施氮量的增加,稻田土壤固碳量有升高的趋势。SU3 处理的固碳量最大,即秸秆:N 约为 27:1 时,稻田土壤固碳效果最佳。其中,SU3 和 SU4 处理土壤固碳量分别为 147.74 kg·hm⁻² 和 131.69 kg·hm⁻²,而单施同等量氮肥的 U3 和 U4 处理土壤固碳量仅为 85.97 kg·hm⁻² 和 104.98 kg·hm⁻²。与对照相比,S 处理的土壤固碳量为 68.85 kg·hm⁻²,是对照的近 2 倍,与低量单施氮肥的处理(U1 和 U2)接近。在单施氮肥处理中,土壤固碳量同样随施氮量的增加而增加,但仅施氮量最高处理(U4)的土壤固碳量显著高于对照。

2.3 稻田温室气体(N₂O、CH₄、CO₂)排放通量

在水稻季,稻田土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 均表现为净释放,在分蘖期、拔节期、成熟期,各处理 3 种温室气体的平均通量差异显著,并呈不同排放规律。图 2a 显示水稻生长季内各处理稻田 N₂O 排放通量的季节动态变化。可以看出,施加氮肥显著增加 N₂O 的排放量,单施氮肥(U3)处理的 N₂O 通量最大值接近 400 μg·m⁻²·h⁻¹,且主要发生在水稻拔节期。图 3a 显示不同生长时期稻田 N₂O 的平均排放量,在水稻拔节期 U3 处理 N₂O 平均排放量为 316.1 μg·m⁻²·h⁻¹,显著高于单一秸秆还田(S)处理的 15.6 μg·m⁻²·h⁻¹ 和对照的 12.9 μg·m⁻²·h⁻¹。在分蘖期和拔节期,秸秆配施氮肥处理(SU3)稻田 N₂O 平均排放量分别为 31.7、24.4 μg·m⁻²·h⁻¹,显著低于 U3 处理,降幅达 60.5 %和 92.3%,说明秸秆与氮肥配合施用可显著降低农业源温室气体 N₂O 的排放。

如图 2b 显示,总体上,添加秸秆显著增加稻田生态系统 CO₂ 排放通量。单一秸秆还田(S)处理的 CO₂



图中不同字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)
Different letters indicate significant difference among different treatments at 0.05 level

图 1 水稻生育期内不同处理的土壤固碳量

Figure 1 The soil C sequestration during the rice growth period among different treatments

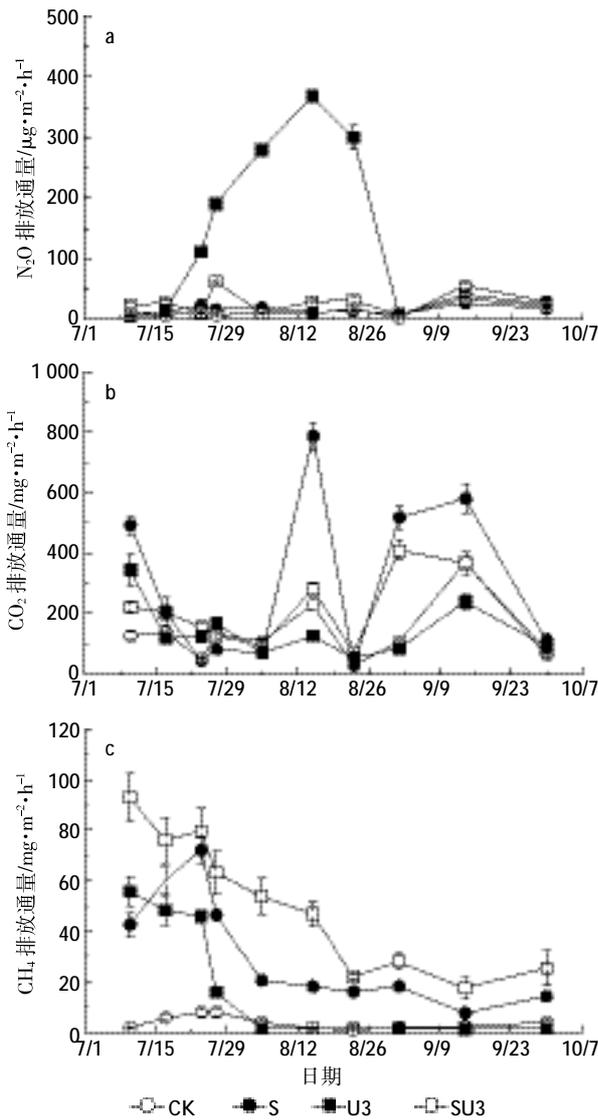
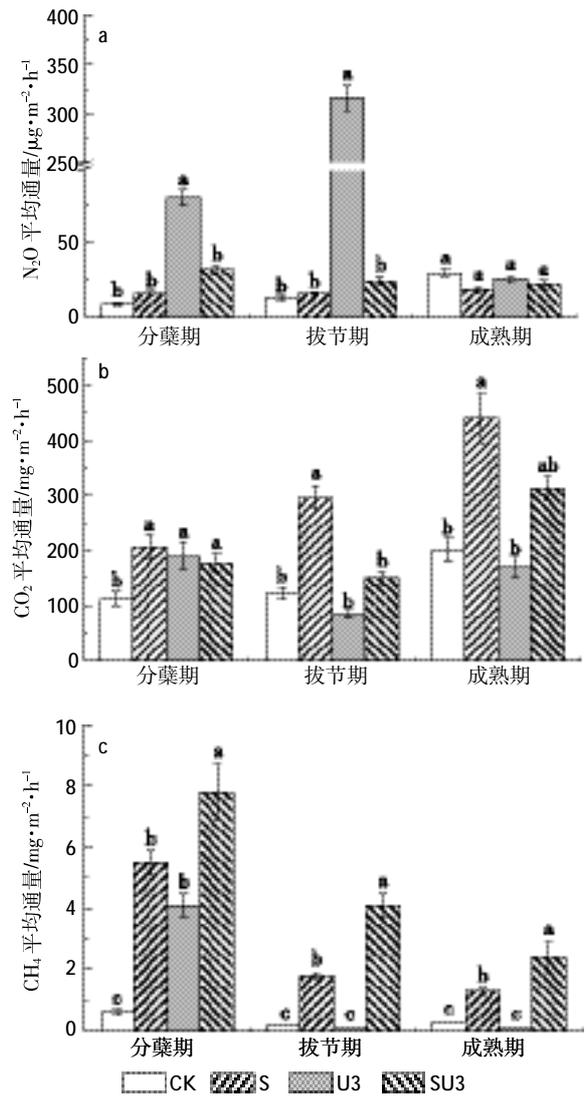


图 2 水稻生育期内不同处理 N₂O、CO₂、CH₄ 通量的季节变化
Figure 2 Seasonal changes of CO₂, CH₄, N₂O flux of different treatments during the rice growth period

最高排放通量接近 $800 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，显著高于对照和单施氮肥处理。图 3b 显示不同生长时期稻田 CO₂ 的平均排放量，水稻季 CO₂ 的排放主要集中在拔节期和成熟期。与对照相比，添加秸秆显著增加 CO₂ 的排放量。在水稻分蘖期，S 和 SU3 处理 CO₂ 的平均排放量分别为 206.6 、 $177.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，高于 CK 的 $106.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在拔节期和成熟期，虽然 SU3 处理 CO₂ 排放量高于对照和 U3 处理，但是低于 S 处理，其降幅分别达 49.5% 和 29.2% ，表明秸秆与氮肥配合施用可较单一秸秆还田显著降低稻田生态系统 CO₂ 排放量。

由图 2c 所示，水稻季 CH₄ 的排放呈先高后低的



图中不同字母表示同一时期不同处理间差异显著， $P < 0.05$
Different letters indicate significant difference among treatments in the same period at 0.05 level.

图 3 水稻生育期不同处理 CO₂、CH₄、N₂O 的平均通量
Figure 3 Seasonal changes in CO₂, CH₄, N₂O average fluxes from paddy fields by different treatments

趋势，且秸秆还田配施氮肥处理显著增加稻田 CH₄ 的排放量。图 3c 显示了 CH₄ 平均排放量在不同生长时期的变化规律，稻田 CH₄ 排放主要发生在分蘖期，水稻分蘖期 SU3 处理的 CH₄ 平均排放通量为 $7.86 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，占水稻生育期 CH₄ 净排放总量的 53.2% ，显著高于对照和其他处理。与对照相比，水稻分蘖期 U3 和 S 处理的 CH₄ 排放量亦分别达到 4.2 、 $5.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，差异显著。但随后各处理 CH₄ 排放量迅速降低，至成熟期，U3 处理的 CH₄ 平均排放量仅为 $0.14 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，与该时期对照的 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，无显著差异。

2.4 稻田温室气体累积排放量

稻田生长季内各处理 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 均表现为净释放,其中以 CO_2 排放量最大, CH_4 排放量次之, N_2O 排放量最低。由表 3 所示,添加秸秆与氮肥显著影响 3 种温室气体的排放情况,不同处理之间温室气体累积排放量差异显著。S 处理 CO_2 累积排放量最高,达 $7\,242.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,显著高于其他处理。SU3 处理的 CO_2 累积排放量为 $5\,669.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,虽然分别较 CK 和 U3 处理高出 32.3%和 39.2%,但是显著低于 S 处理。与之相比,SU3 处理的 CH_4 累积排放量最大,累积排放量达 $128.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,分别是 CK、S 和 U3 处理的 6.7、1.5 倍和 3.6 倍,说明秸秆配施氮肥处理降低 CO_2 累积排放的同时,却显著增加了稻田 CH_4 的排放量。此外,单施氮肥处理的 N_2O 累积排放量显著高于其他处理。SU3 处理 N_2O 累积排放量仅为 U3 处理的 44.6%,说明氮肥配施秸秆有效地降低了 N_2O 的排放。

2.5 稻田温室气体强度及综合温室效应

温室气体强度和综合温室效应是有效评估温室气体对温室效应贡献的重要指标。由表 4 可知,SU3

和 U3 处理的水稻产量分别为 $14\,483\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $14\,833\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,显著高于 CK 和 S 处理,而 U3 与 SU3 处理间无显著差异。SU3 处理的土壤固碳效果显著优于其他处理,分别是 CK、S 和 U3 处理的 3.8、2.5 倍和 1.7 倍,说明秸秆配施氮肥显著增加了土壤固碳量。S、U3、SU3 处理的综合温室效应及温室气体强度均显著高于 CK 处理。U3 处理的综合温室效应和温室气体强度分别为 $9\,339.94\text{ kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.630\text{ kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}$,均显著高于 SU3 处理的 $5\,394.22\text{ kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.372\text{ kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。综上所述,秸秆还田配施氮肥措施不仅有利于稳定水稻产量和土壤固碳,并且可显著减缓和降低由于单施氮肥所造成的较高综合温室效应和温室气体强度。

由表 5 可知,施用氮肥极显著影响水稻的产量,而添加秸秆对水稻产量的影响不显著。施氮和秸秆添加对土壤固碳量呈显著正相关,而施氮和秸秆互作效应对土壤固碳量影响不显著。由于单施氮肥和秸秆还田均显著增加 N_2O 和 CH_4 的排放,稻田净综合温室效应和温室气体排放强度与氮肥和秸秆添加呈显著正相关关系,而秸秆氮肥互作对净综合温室效应和温室气体排放强度影响不显著。

表 3 水稻生育期各处理温室气体的累积排放量
Table 3 Cumulative emissions of greenhouse gases by different treatments

处理	CH_4 累积排放量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	CO_2 累积排放量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	N_2O 累积排放量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
CK	19.2±2.7c	3 840.4±353.2c	0.82±0.1c
S	86.7±10.7b	7 242.8±526.7a	1.55±0.2b
U3	35.7±10.9c	3 446.8±395.2c	3.54±0.3a
SU3	128.0±13.0a	5 669.1±389.7b	1.58±0.2b

表 4 各处理水稻产量、土壤固碳量、净综合温室效应及温室气体强度
Table 4 Rice yield, soil C sequestration, GWP and GHGI by each treatment

处理	产量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	土壤固碳量 ATCS/ $\text{kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}$	净综合温室效应 GWP/ $\text{kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}$	温室气体强度 GHGI/ $\text{kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}$
CK	12 533±235b	143.0±36.3c	4 564.76±261c	0.364±0.012c
S	12 100±408b	252.5±41.9b	9 872.2±473a	0.816±0.030a
U3	14 833±276a	315.2±61.1b	9 339.94±502a	0.630±0.034b
SU3	14 483±166a	541.7±59.1a	5 394.22±298b	0.372±0.019c

表 5 秸秆(S)与氮肥(U)对稻田温室气体累积排放量、水稻产量、净综合温室效应和温室气体强度影响的双因素方差分析
Table 5 Two-factor variance analysis of effects of straw and nitrogen fertilizer on greenhouse gas emissions, rice yield, GWP and GHGI

因素 Factor	自由度 DF	产量		土壤固碳量 ATCS		净综合温室效应 GWP		温室气体强度 GHGI	
		F	Sig.	F	Sig.	F	Sig.	F	Sig.
S	1	0.75	0.403	8.33	<0.05	11.60	<0.001	13.68	<0.001
U	1	46.03	<0.001	0.98	<0.05	10.80	<0.05	7.09	<0.05
S×U	1	0.02	0.889	0.19	0.41	0.17	0.685	3.16	0.527
Model	3	15.60				7.51		7.10	

土壤固碳潜力的重要农业措施。秸秆还田可以通过增加土壤有机碳的直接输入,实现固碳^[19],而施用氮肥可以通过提高根茬还田生物量,从而提高土壤表层固碳速率^[20]。本研究结果显示,在秸秆还田与氮肥施入条件下,水稻生育期内土壤有机质含量有随施氮量的增加而增加的趋势。该结果与逯非等^[13]和刘世平等^[21]的研究结果相似,证实了秸秆还田与氮肥施用是提高稻田土壤固碳潜力方面的重要作用。

本研究还表明较单施氮肥和秸秆还田处理,秸秆配施氮肥对土壤有机质和固碳效果的提升更为明显。秸秆配施氮肥各处理的土壤有机质含量较单施同氮量氮肥处理增加 9.2%~11.2%,较单一秸秆还田处理增加 12.4%~52.9%(表 2)。该结果与朱利群等^[22]长期有机无机肥配施较单施有机肥对稻田表土有机碳含量平均提高 14.3%的研究结果相近,但高于汪军等^[23]的 3.7%~7.7%,这可能是由于不同利用年限、不同土壤类型的 C/N 差异显著所致。练成燕等^[24]的研究结果显示,多年高量秸秆还田导致较高的 C/N,进而有抑制土壤有机质增加速率的趋势。Tong 等^[25]和王伏伟等^[26]的研究也表明,配施氮肥可调节秸秆还田过程中稻田土壤 C/N 的过快升高,促进根层土壤细菌活动,提高土壤固碳细菌群落的多样性,促进秸秆分解和土壤有机质的形成。本试验地稻田土壤属棕红壤土,原始土样 C/N 平均为 15.79,收获后稻田土壤 C/N 变化范围为 14.03~20.81,低于汪军等^[23]对普通潜育水耕人为土的观测结果(C/N=55.64),但高于潘根兴等^[27]对太湖地区黄泥土的观测结果(C/N≈9.52)。由于本研究开展年限较短,也说明对棕红壤土开展短期秸秆和氮肥施加处理,秸秆和氮肥施入均会促进土壤有机质的积累。长期试验结果表明,有机无机配施可更有效促进土壤大团聚体内微团聚体的形成,从而使更多新添加的颗粒有机物被新形成微团聚体,从而显著提高土壤的固碳速率^[28-29]。本研究秸秆配施氮肥提高土壤有机质含量,提高土壤 C/N,降低土壤容重,改善了稻田土壤理化性质。秸秆还田对稻田土壤固碳作用的提高可有效缓解温室效应,然而,由于秸秆还田一般增加稻田 CO₂ 的排放,可能会部分或全部抵消土壤固碳效益。因此,本研究在对秸秆与氮肥施用下稻田土壤固碳量进行计算的同时,考虑了温室气体的排放,综合验证秸秆配施氮肥的固碳效果。

3.2 秸秆还田配施氮肥对稻田温室气体排放与净温室气体效应的影响

对于秸秆还田对稻田 CO₂ 排放通量的影响,众多

研究显示秸秆还田之后由于微生物对秸秆的腐解以及土壤矿质养分的转化,在好氧条件下即表现为土壤呼吸作用加强,导致土壤 CO₂ 排放量增加^[30]。本研究也得到了类似的结论,与对照和单施氮肥处理相比,添加秸秆处理显著增加了 CO₂ 的累计排放量。秸秆添加为微生物提供了碳源物质、能量以及适宜条件,从而提高了微生物数量及活性,促进微生物呼吸而释放的 CO₂ 量增多^[31-32]。

秸秆还田对稻田 N₂O 排放的影响存在争议。本研究结果显示,与单施氮肥处理相比,秸秆还田和秸秆配施氮肥可显著降低土壤 N₂O 的累计排放量。单施氮肥处理的 N₂O 积累排放量显著高于 CK、S、SU 处理,可能由于单施氮肥处理中较集中的氮素易以 N₂O 的形式损失。有研究显示^[33-35],与单施氮肥处理相比,秸秆的添加在一定范围内提高土壤 C/N,土壤生态系统表现为碳源过剩而氮源不足,微生物为满足自身生物物质的合成而被迫利用土壤其他可利用氮源,减少了硝化与反硝化作用所需底物,从而对 N₂O 形成具有抑制作用,因此,秸秆配施氮肥可显著降低 N₂O 的积累排放量。随着生长后期秸秆的腐解和晾田等水分管理措施,硝化与反硝化作用逐渐增强,致使在水稻成熟期 N₂O 排放量上升,但各处理之间 N₂O 排放的平均通量差异不显著。

CH₄ 产生于土壤的严格厌氧环境中,是稻田生态系统产生的重要温室气体。秸秆与氮肥的添加对 CH₄ 的产生、氧化与运输过程均会产生显著影响^[4]。添加秸秆改善稻田土壤理化性状^[36],改变土壤微生物的区系及其活性^[37],并在秸秆分解过程中为 CH₄ 的产生提供产 CH₄ 底物^[38],从而影响稻田生态系统 CH₄ 的排放。Hu 等^[39]的研究也表明氮肥中的 NH₄⁺对农田土壤 CH₄ 氧化有强抑制作用,氮肥的施用对土壤 CH₄ 的氧化有一定影响。在本研究中,秸秆配施氮肥处理的 CH₄ 排放量在水稻生长各时期均显著高于其他处理,说明与秸秆还田和单施氮肥相比,秸秆配施氮肥处理更有利于 CH₄ 的产生。与单一添加秸秆相比,秸秆配施氮肥降低土壤 C/N,更有利于秸秆腐解而为产甲烷菌提供更丰富的碳源物质^[40]。此外,分蘖期水稻植株根系及透气组织最为发达,在一定程度上也会促进 CH₄ 的排放^[41]。本研究分蘖期稻田 CH₄ 的排放显著高于其他时期,应与该时期水稻植株的生长和水热环境有关^[42]。

在本研究中,添加秸秆和氮肥最终会影响稻田生态系统的增温潜势和温室气体排放强度。本研究净温

室气体排放强度(GHGI)在 $0.36\sim 0.82\text{ kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间,低于 Li 等^[43]根据 DNDC 模型模拟的长期淹水稻田的结果($3.22\text{ kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}$),但与 Qin 等^[44]和刘晓雨等^[45]采取秸秆还田配施有机肥的结果相似($0.24\sim 0.74$ 、 $0.53\sim 1.15\text{ kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}$)。生态系统温室气体排放强度和增温潜势的大小与土壤固碳量、作物产量、 CH_4 和 N_2O 排放量有直接关系。从本文对添加秸秆和氮肥短期作用的结果来看,秸秆还田和添加氮肥后,水稻产量提高,土壤有机碳量得到显著提高,这与秸秆还田对稻田土壤具有可观的固碳潜力相一致^[17],且固碳量随配施氮肥量增多而增大;然而,从本研究还可以看出,虽然添加秸秆和氮肥有效地增加了稻田土壤固碳量和水稻产量,但是由于 CH_4 和 CO_2 的大幅增排,其对减缓全球变暖的贡献的抵消作用非常明显,使单一秸秆还田处理增温潜势和温室气体排放强度与单施氮肥处理无显著差异。因此必须考虑加入其他农艺措施,以有效发挥稻田秸秆还田的固碳潜力和降低温室气体排放的潜力。秸秆配施氮肥处理,可操作性强,在降低综合温室效应和温室气体强度方面效果显著,然而,由于本研究只针对一个水稻季的研究,缺乏对其固碳减排效果的长期探索,因此针对当地气候和管理特点,有待于进一步加强长期研究,以消除本研究的不确定性。

4 结论

秸秆还田和施氮水平均影响稻田土壤固碳和温室气体的排放。秸秆还田与施用氮肥显著提高土壤固碳量,且土壤固碳量随施氮量的增加呈升高趋势。施氮显著增加稻田生态系统 N_2O 的排放,单一秸秆还田显著增加 CO_2 的排放量。秸秆还田配施氮肥显著降低 N_2O 的排放量,却增加 CH_4 的累积排放量。与单施氮肥和秸秆还田处理相比,秸秆配施氮肥显著降低温室气体强度与净综合温室效应,因此秸秆还田配施氮肥是降低温室气体排放强度、减缓净温室效应的有效措施。

参考文献:

- [1] 郝建华,丁艳丰,王强盛,等. 麦秸还田对水稻群体质量和土壤特性的影响[J]. 南京农业大学学报, 2010, 33(3):13-18.
Hao J H, Ding Y F, Wang Q S, et al. Effect of wheat crop straw application on the quality of rice population and soil properties[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2010, 33(3):13-18. (in Chinese)
- [2] 陈中玉,张祖立,白小虎. 农作物秸秆的综合开发利用[J]. 农机化研究, 2007(5):194-196.

- CHEN Z Y, ZHANG Z L, BAI X H. Comprehensive exploitation and utilization of crop straw[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(5):194-196. (in Chinese)
- [3] 沈裕璇,黄相国,王海庆. 秸秆覆盖的农田效应[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(1): 45-50.
SHEN Y H, HUANG X G, WANG H Q. Field effects of straw mulching[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1998, 16 (1): 45-50. (in Chinese)
- [4] 王汉中. 我国油菜产需形势分析及产业发展对策[J]. 中国油料作物学报, 2007, 29(1):101-105.
WANG Han-zhong. Strategy for rapeseed industry development based on the analysis of rapeseed production and demand in China [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2007, 29(1):101-105. (in Chinese)
- [5] 宋新南,房仁军,王新忠,等. 油菜秸秆资源化利用技术研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(6): 984-991.
SONG Xin-nan, FANG Ren-jun, WANG Xin-zhong, et al. Research on resource utilization technology of rape straw[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(6): 984-991. (in Chinese)
- [6] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010: 70-140.
- [7] 毕于运. 秸秆资源评价与利用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
BI Yu-yun. Study on straw resources evaluation and utilization[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010. (in Chinese)
- [8] 侯亚红,王磊,付小花,等. 土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制[J]. 环境科学, 2015(7): 2655-2661.
HOU Ya-hong, WANG Lei, FU Xiao-hua, et al. Response of straw and straw biochar returning to soil carbon budget and its mechanism[J]. Environmental Science, 2015(7): 2655-2661. (in Chinese)
- [9] 刘禹池,曾祥忠,冯文强,等. 稻-油轮作下长期秸秆还田与施肥对作物产量和土壤理化性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014(6): 1450-1459.
LIU Yu-chi, ZENG Xiang-zhong, FENG Wen-qiang, et al. Effects of long-term straw mulch and fertilization on crop yields and soil physical and chemical properties under rice-rapeseed rotation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilize, 2014(6): 1450-1459. (in Chinese)
- [10] 顾道健,薛朋,陆希婕,等. 秸秆还田对水稻生长发育和稻田温室气体排放的影响[J]. 中国稻米, 2014, 20(3):1-5.
GU Dao-jian, XUE Peng, LU Xi-jie, et al. Effect of straw returning on the growth and development of rice and greenhouse gas emission from rice field[J]. China Rice, 2014, 20(3):1-5. (in Chinese)
- [11] Hansen J E, Laci A A. Sun and dust versus greenhouse gases: An assessment of their relative roles in global climate change[J]. Nature, 1990, 346: 713-719.
- [12] 王明星,李晶,郑循华. 稻田甲烷排放及产生、转化、输送机理[J]. 大气科学, 1998, 22(4): 218-230.
WANG Ming-xing, LI Jing, ZHENG Xun-hua. Mechanism of production, transformation, transport and emission of paddy methane[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1998, 22(4): 218-230. (in Chinese)
- [13] 逯非,王效科,韩冰,等. 稻田秸秆还田: 土壤固碳与甲烷增排[J]. 应用生态学报, 2010(1): 99-108.

- LU Fei, WANG Xiao-ke, HAN Bing, et al. Rice straw returning to field: Soil carbon fixation and methane enhancement [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010(1): 99-108. (in Chinese)
- [14] 石生伟, 李玉娥, 李明德, 等. 不同施肥处理下双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放的全年观测研究[J]. *大气科学*, 2011(4):707-720.
SHI Sheng-wei, LI Yu-e, LI Ming-de, et al. Annual CH_4 and N_2O emissions from double rice cropping systems under various fertilizer regimes in Hunan Province, China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2011(4): 707-720. (in Chinese)
- [15] 马 静, 徐 华, 蔡祖聪. 施肥对稻田甲烷排放的影响[J]. *土壤*, 2010, 42(2):153-163.
MA Jing, XU Hua, CAI Zu-cong. Effect of fertilization on methane emissions from rice fields[J]. *Soil*, 2010, 42(2):153-163. (in Chinese)
- [16] 谢义琴, 张建峰, 姜慧敏, 等. 不同施肥措施对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015(3): 578-584.
XIE Yi-qin, ZHANG Jian-feng, JIANG Hui-min, et al. Effect of different fertilization practices on greenhouse gas emissions from paddy soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015(3):578-584 (in Chinese)
- [17] 李成芳, 寇志奎, 张枝盛, 等. 秸秆还田对免耕稻田温室气体排放及土壤有机碳固定的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(11): 2362-2367.
LI Cheng-fang, KOU Zhi-kui, ZHANG Zhi-sheng, et al. Effects of rape residue mulch on greenhouse gas emissions and carbon sequestration from no-tillage rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2362-2367. (in Chinese)
- [18] 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等. 免耕条件下稻草还田方式对温室气体排放强度的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(6):210-216.
QIN Xiao-bo, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Effects of straw mulching on greenhouse gas intensity under on-tillage conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(6): 210-216. (in Chinese)
- [19] 孟 磊, 丁维新, 蔡祖聪, 等. 长期定量施肥对土壤有机碳储量和土壤呼吸影响[J]. *地球科学进展*, 2005(6): 687-692.
MENG Lei, DING Wei-xin, CAI Zu-cong, et al. Storage of soil organic C and soil respiration as effected by long-term quantitative fertilization [J]. *Advances in Earth Science*, 2005(6):687-692. (in Chinese)
- [20] 张国荣, 李菊梅, 徐明岗, 等. 长期不同施肥对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. *中国农业科学*, 2009(2): 543-551.
ZHANG Guo-rong, LI Ju-mei, XU Ming-gang, et al. Effects of chemical fertilizer and organic manure on rice yield and soil fertility[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009(2):543-551. (in Chinese)
- [21] 刘世平, 陈后庆, 聂新涛, 等. 稻麦两熟制不同耕作方式与秸秆还田土壤肥力的综合评价[J]. *农业工程学报*. 2008(5):51-56.
LIU Shi-ping, CHEN Hou-qing, NIE Xin-tao, et al. Comprehensive evaluation of tillage and straw returning on soil fertility[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008(5): 51-56. (in Chinese)
- [22] 朱利群, 杨敏芳, 徐敏轮, 等. 不同施肥措施对我国南方稻田表土有机碳含量及固碳持续时间的影响[J]. *应用生态学报*, 2012(1): 87-95.
ZHU Li-qun, YANG Min-fang, XU Min-lun, et al. Effects of different fertilization modes on paddy field topsoil organic carbon content and carbon sequestration duration in south China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012(1):87-95. (in Chinese)
- [23] 汪 军, 王德建, 张 刚, 等. 连续全量秸秆还田与氮肥用量对农田土壤养分的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(5): 40-44.
WANG Jun, WANG De-jian, ZHANG Gang, et al. Effects of different nitrogen fertilizer rate with continuous full amount of straw incorporated on paddy soil nutrients[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(5): 40-44. (in Chinese)
- [24] 练成燕, 张桃林, 王兴祥. 有机物料对红壤几种形态碳氮及酸度的影响[J]. *中国农业科学*, 2009(11): 3922-3932.
LIAN Cheng-yan, ZHANG Tao-lin, WANG Xing-xiang. Effects of organic materials on several forms of soil carbon and nitrogen and soil acidity[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009(11):3922-3932. (in Chinese)
- [25] Tong C L, Xiao H A, Tang G Y, et al. Long-term fertilizer effects on organic carbon and total nitrogen and coupling relationships of C and N in paddy soils in subtropical China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 106(1): 8-14.
- [26] 王伏伟, 王晓波, 李金才, 等. 施肥及秸秆还田对砂姜黑土细菌群落的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2015(10): 1302-1311.
WANG Fu-wei, WANG Xiao-bo, LI Jin-cai, et al. Effects of fertilization and straw incorporation on bacterial communities in lime concretion black soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015(10): 1302-1311. (in Chinese)
- [27] 潘根兴, 周 萍, 张旭辉, 等. 不同施肥对水稻土作物碳同化与土壤碳固定的影响——以太湖地区黄泥土肥料长期试验为例[J]. *生态学报*, 2006, 26(11): 3704-3710.
PAN Gen-xing, ZHOU Ping, ZHANG Xu-hui, et al. Effect of different fertilization practices on crop carbon assimilation and soil carbon sequestration: A case of a paddy under a long-term fertilization trial from the Tai Lake region, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11): 3704-3710. (in Chinese)
- [28] Deneff K, Six J, Paustian K, et al. Importance of macro aggregate dynamics in controlling soil carbon stabilization: Short-term effects of physical disturbance induced by dry-wet cycles[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33: 2145-2153
- [29] 李清华, 王 飞, 林 诚, 等. 长期施肥对黄泥田土壤微生物群落结构及团聚体组分特征的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015(6): 1599-1606.
LI Qing-hua, WANG Fei, LIN Cheng, et al. Effects of long-term fertilization on soil microbial community structure and aggregate composition in yellow clayey paddy field[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015(6):1599-1606. (in Chinese)
- [30] 贺 京, 李涵茂, 方 丽, 等. 秸秆还田对中国农田土壤温室气体排放的影响[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(20):246-250.
HE Jing, LI Han-mao, FANG Li, et al. Influence of straw application on agricultural greenhouse gas emissions in China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(20):246-250. (in Chinese)
- [31] Manna M C, Swarup A, Wanjar R H. Soil organic matter in a west Bengal inceptisol after 30 years of multiple cropping and fertilization[J]. *Soil*

- Science Society of America Journal, 2006,70:121-129.
- [32] 高峻岭, 宋朝玉, 李祥云, 等. 不同有机肥配比对蔬菜产试和品质及土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008(1):48-51.
GAO Jun-ling, SONG Chao-yu, LI Xiang-yun, et al. Effect of different combinations of organic manures on vegetables yield, quality and soil fertility[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2008(1):48-51. (in Chinese)
- [33] 张冉, 赵鑫, 濮超, 等. 中国农田秸秆还田土壤 N₂O 排放及其影响因素的 Meta 分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22):1-6.
ZHANG Ran, ZHAO Xin, PU Chao, et al. Meta-analysis on effects of residue retention on soil N₂O emissions and influence factors in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(22):1-6. (in Chinese)
- [34] Garcia R, Baggs E M. N₂O emission from soil following combined application of fertiliser-N and ground weed residues[J]. Plant and Soil, 2007, 299(1/2): 263-274.
- [35] CHEN Huaihai, LI Xuechao, HU Feng, et al. Soil nitrous oxide emissions following crop residue addition: A meta-analysis [J]. Global Change Biology, 2013, 19(10):2956-2964.
- [36] 戴志刚, 鲁剑巍, 周先竹, 等. 不同耕作模式下秸秆还田对土壤理化性质的影响[J]. 中国农技推广, 2012, 28(3):46-48.
DAI Zhi-gang, LU Jian-wei, ZHOU Xian-zhu, et al. Effect of straw returning on soil physical and chemical properties under different tillage patterns[J]. China Agricultural Technology Extension, 2012, 28(3): 46-48. (in Chinese)
- [37] 杨滨娟, 黄国勤, 钱海燕, 等. 秸秆还田对稻田生态系统环境质量影响的初步研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(2):200-208.
YANG Bin-juan, HUANG Guo-qin, QIAN Hai-yan, et al. The preliminary research about the influence of rice-straw returning on the rice ecosystem environment quality[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012,28(2):200-208. (in Chinese)
- [38] 张广斌, 张晓艳, 纪洋, 等. 冬季秸秆还田对冬灌田水稻生长期 CH₄ 产生、氧化和排放的影响[J]. 土壤, 2010, 42(6): 895-900.
ZHANG Guang-bin, ZHANG Xiao-yan, JI Yang, et al. Effects of rice straw application in winter on CH₄ production, oxidation, and emission from continuously flooded rice field during the rice-growing season[J]. Soils, 2010, 42(6): 895-900. (in Chinese)
- [39] Hu R G, Hatano R, Kusa K, et al. Effect of nitrogen fertilization on methane flux in an onion field in central Hokkaido, Japan[J]. Soil Sci Plant Nutri, 2002, 48(4): 797-804.
- [40] 周叶锋, 廖晓兰. 影响甲烷排放量的两种细菌——产甲烷细菌和甲烷氧化菌的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2007, S1:340-346.
ZHOU Ye-feng, LIAO Xiao-lan. Emission of methane from environment affected by methanogens and methanotrophs [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, S1: 340-346. (in Chinese)
- [41] 代光照, 李成芳, 曹凑贵, 等. 免耕施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放及其温室效应的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9):2166-2172.
DAI Guang-zhao, LI Cheng-fang, CAO Cou-gui, et al. Effects of no-tillage and fertilization on paddy soil CH₄ and N₂O emissions and their greenhouse effect in central China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(9): 2166-2172. (in Chinese)
- [42] 杨娟, 王昌全, 白根川, 等. 秸秆还田下“麦-稻”轮作生产生命周期能耗及温室气体排放[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(1):196-204.
YANG Juan, WANG Chang-quan, BAI Gen-chuan, et al. Life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions of wheat-rice rotation system with straw returning[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(1):196-204. (in Chinese)
- [43] Li C S, Salas W, De Angelo B, et al. Assessing alternatives for mitigating net greenhouse gas emissions and increasing yields from rice production in China over the next twenty years[J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35(4): 1554-1565.
- [44] Qin Y M, Liu S W, Guo Y Q, et al. Methane and nitrous oxide emissions from organic and conventional rice cropping systems in southeast China[J]. Biology and Fertility of Soils, 2010, 46(8): 825-834.
- [45] 刘晓雨, 李志鹏, 潘根兴, 等. 长期不同施肥下太湖地区稻田净温室效应和温室气体排放强度的变化[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9):1783-1790.
LIU Xiao-yu, LI Zhi-peng, PAN Gen-xing, et al. Greenhouse gas emission and C intensity for a long-term fertilization rice paddy in Tai Lake region, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(9): 1783-1790. (in Chinese)